

УДК 621.793.79

**И. Д. Кучумова^{1,2*}, И. С. Батраев², Н. Ю. Черкасова¹, Д. К. Рыбин²,
А. В. Ухина³**

¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

² Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

*ivannakz@mail.ru

Научный руководитель — д-р техн. наук Д. В. Дудина

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА МОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ ЧАСТИЦ ПОРОШКА СПЛАВА $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$

В работе представлены результаты исследования влияния обработки в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице на морфологию частиц и фазовый состав порошка сплава $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$. Исходный порошок сплава получен методом газового распыления и имеет кристаллическую структуру. Установлено, что механическая обработка порошка сплава приводит к его аморфизации. Увеличение содержания аморфной фазы с увеличением времени механической обработки от 2 до 10 мин связано с накоплением неравновесных дефектов в структуре сплава.

Ключевые слова: планетарная шаровая мельница, морфология, порошок, газовое распыление, аморфная фаза, многокомпонентный сплав, фазовый состав

I. D. Kuchumova, I. S. Batraev, N. Y. Cherkasova, D. K. Rybin, A. V. Ukhina

THE INFLUENCE OF TREATMENT IN A HIGH-ENERGY PLANETARY BALL MILL ON THE MORPHOLOGY AND STRUCTURE OF $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ POWDER

In the present work, the morphology and phase changes occurring upon treatment of a $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ powder in a high-energy planetary ball mill were studied. The powder alloy was obtained by gas atomization and consisted of crystalline phases. It was found that mechanical treatment resulted in amorphization of the alloy. An increase in the content of the amor-

phous phase in the alloy with an increase in the treatment time from 2 min to 10 min was caused by accumulation of non-equilibrium defects in the structure of the alloy.

Key words: planetary ball mill, morphology, powder, gas atomization, amorphous phase, multicomponent alloy, phase composition

Порошок многокомпонентного сплава $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ был получен методом газового распыления на установке HERMIGA 75/5VI (Phoenix Scientific Industries Ltd., Великобритания) с использованием аргона. Для разделения полученного порошка на фракции использовали рассев на ситах. Было получено четыре фракции: менее 45 мкм, 45–75 мкм, 75–106 мкм и 106–130 мкм.

Для формирования качественных покрытий методом детонационного напыления необходимо использовать порошок с узким распределением частиц по размеру и средним размером частиц около 50 мкм [1]. Ранее нами были получены покрытия с аморфной структурой из порошка $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ (фракция 45–75 мкм); пористость покрытий составила ~ 1 %, содержание аморфной фазы в покрытиях ~ 99 вес. % [2]. В работе предложено использовать механическую обработку крупных фракций порошка в планетарной шаровой мельнице для получения частиц с размерами, позволяющими использовать их в технологии детонационного напыления.

Порошок $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ фракции 106–130 мкм подвергали обработке в планетарной шаровой мельнице-активаторе АГО-2 (Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН) при центробежном ускорении шаров, равном 600 м с^{-2} . Время обработки составляло 2–15 мин. Обработку проводили в атмосфере аргона. Исследование морфологии частиц порошков проводили с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP (Германия). Для проведения рентгенофазового анализа порошков использовали дифрактометр D8 Advance (Bruker AXS, Германия) с $\text{Cu K}\alpha$ излучением. Содержание аморфной фазы в порошках сплава определяли методом Ритвельда в программном комплексе Topas 4.2 (Bruker AXS, Германия).

На рис. 1 представлены микрофотографии частиц исходного и обработанного порошка. Частицы исходного порошка имеют сферическую форму. Механическая обработка порошка в течение 2 мин приводит к образованию частиц неправильной формы с развитой поверхностью, размер частиц составляет 20–60 мкм (рис. 1, б). Дальнейшее увеличе-

ние времени обработки способствует значительному уменьшению размера частиц порошка (рис. 1, *в–г*).

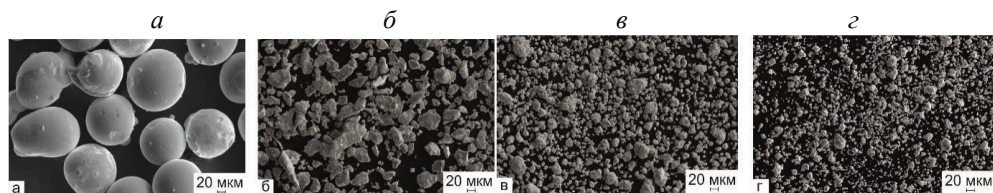


Рис. 1. Морфология частиц порошка $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$:

а — исходный порошок, полученный распылением расплава;
б — 2 мин обработки; *в* — 10 мин обработки; *г* — 15 мин обработки

Исследования фазового состава исходного порошка $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ фракции 106–130 мкм показали, что порошок имеет кристаллическую структуру и содержит $\alpha\text{-Fe}$, Fe_2B , NbFeB и Nb_3B_2 (рис. 2, *а*). Механическая обработка порошка приводит к образованию аморфной фазы, о чем свидетельствует наличие широкого дифракционного гало на углах $2\theta = 40\text{--}50^\circ$ (рис. 2, *б*) на рентгенограммах порошков. Содержание кристаллической фазы в сплаве после обработки в течение 2, 10 и 15 мин обработки в мельнице АГО-2 составляет 20 ± 1 вес. %, 12 ± 1 вес. % и 16 ± 1 вес. %, соответственно.

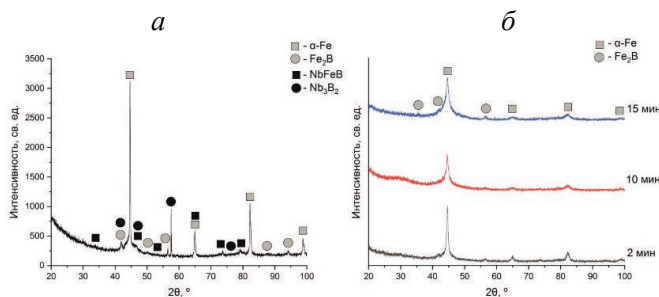


Рис. 2. Фазовый состав порошка $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$:

а — исходный порошок; *б* — после обработки в мельнице АГО-2

Интенсивное механическое воздействие при обработке в мельнице приводит к хрупкому разрушению частиц сплава. В ходе механической обработки происходит накопление неравновесных структурных дефектов, таких как вакансии и дислокации, и уменьшения размера

зерна фаз. Значительное увеличение количества дефектов приводит к увеличению параметров кристаллических решеток фаз, что способствует аморфизации многокомпонентного сплава [3].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
и Правительства Новосибирской области в рамках проекта
№ 19-43-543034.*

Литература

1. Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л. : Машиностроение, 1982. 216 с.
2. Formation of metallic glass coatings by detonation spraying of a $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{B}_{19}$ powder / I. Kuchumova [et al.] // Metals. 2019. V. 9. P. 846–858.
3. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling // Progress in Materials Science. 2001. V. 46. P. 1–184.